

[2 a - 1]

## BPM System of ATF Linac

H. Hayano, F. Hinode, K. Oide, N. Terunuma, S. Kashiwagi\* and T. Ishii\*\*

National Laboratory for High Energy Physics

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

\*The graduate university for advanced studies

\*\*Kanto-Joho service co.

### Abstract

The beam position monitor system of ATF Linac is installed and used in usual beam operation. The system consists of button-type electrode and strip-line type electrode with high resolution electronics. The design and development study of the BPM has been completed and described here in detail. The beam orbit which is measured by the system is corrected by the code 'SAD' in order to have a straight orbit in the linac.

### ATFリニアックのBPMシステム

#### 1. はじめに

リニアコライダでは1.4ns間隔の100バンチ程度のマルチバンチビームとなり、その軌道制御のためには、個々のバンチの位置変化も測定する必要があるが、まず全バンチ平均のビーム位置測定が必須である。要求される分解能はエミッタンス増大を数%以下に抑さえるビームベースドアライメントを行なうために1 $\mu$ m以下である。リニアコライダのための試験加速器(ATF)の1.5GeVリニアックでは2.8ns間隔、20バンチのビームで運転されるが、その軌道測定システムはできる限りリニアコライダにも使用可能な性能のものを使用試験することを考えてその開発を行なった。本稿ではATFリニアックのビーム位置モニター(BPM)システムの詳細について報告する。

#### 2. ストリップラインBPMの開発

ここで採用したピックアップチェンバーは、円筒状の真空チェンバーを切り欠いた様なウェーク場に対するインピーダンスの低い形状をしたストリップライン型である。ボタン電極型の方がより小さくインピーダンス的に有利であるが、使用するエレクトロニクスが低周波領域で動作する型のもので、その領域でS/N比を上げられるストリップライン型を採用した。そのストリップの設計はS/N比を上げられてかつマルチバンチ個々の信号も識別できるくらいの速さ持つ事を念頭に置き、電極のどの場所でも特性インピーダンスが伝送ケーブルと同じ50 $\Omega$ であるようにして行なわれた。おおまかな形状はS/N比を考慮して決められ、50 $\Omega$ にするためにプログラム"POISSON"を用い、ストリップのインピーダンスを計算した。実際のモニターの特性インピーダンスの評価にはTDR(タイムドメインリフレクトメトリー)を用い直接インピーダンスを測定する事で行なった。

さてビーム位置をストリップラインチェンバーからの信号で算出する場合、対向する2個の電極の電圧差を電圧和で規格化した信号からビーム位置を計算するが、円筒形位置モニター以外はその感度係数は有限要素法などの数値計算で得るしかなく、真のビーム位置はその感度係数で再マップして得なければならない。円筒形位置モニターの場合は以下のように代数式で表せるので、再マップも代数式で行える。

$$X' = \frac{r}{2} \frac{\Delta\phi}{\sin\Delta\phi} \frac{V_2 - V_4}{V_2 + V_4} \quad Y' = \frac{r}{2} \frac{\Delta\phi}{\sin\Delta\phi} \frac{V_1 - V_3}{V_1 + V_3}$$

このような背景のもとに、ストリップラインチェンバー

が設計されたが、その外形は参考文献[1]を参照されたい。通常はこのモニターの幾何学中心がQマグネットのボア中心に一致するようにQマグネット内に設置されるが、ATFリニアックの場合Qマグネット用の架台の精度が10 $\mu$ m以下と非常によくかつ架台からQマグネットのボア中心までの精度も20 $\mu$ m程度と高精度に造られているので、メンテナンスの観点から独立したBPM架台を用いておなじQマグネット用架台上に設置した。この時の機械加工精度を50 $\mu$ m以下を要求したので、これらを総合して中心間のずれは55 $\mu$ m程度が期待できる。

#### 3. ストリップラインBPMの性能

##### エレクトロニクスのS/N比

ピックアップ電極からのビームパルス信号からビーム位置情報を引き出すのが信号処理エレクトロニクスの役目であるがこれがBPMの性能の大半を決めてしまう。このエレクトロニクスに要求されるのはシングルショット測定が可能である事で、さらに要求される分解能は1 $\mu$ mを実現すればATFおよびリニアコライダはカバーでき、絶対位置精度はピックアップの機械加工精度以内(50~100 $\mu$ m)であればよいと考えられる。さてシングルショット測定が可能なエレクトロニクスとしてもっともシンプルでS/Nを大きく損なうことなく誤差の入り込む要素の少ないベースバンドサンプルホールド方式を採用することにした。ベースバンド方式はそのスペクトラムの数10MHzの低周波領域のみをフィルターで取りだし必要な信号レベルまで増幅するだけでその後サンプルホールドする。いずれもリニア領域で使用するので誤差の補正も単純である。欠点はクライストロン等からのノイズのバンドと重なっているため、ビーム信号にクライストロンノイズが重乗する。したがってこの方式の場合、エレクトロニクスおよびクライストロン双方ともノイズ対策を完全に施さなければならない。

ビーム位置分解能の限界を決定するのはこの場合パルス信号振幅の大きさ(S)とそれに重乗する熱雑音電圧(N)との比であるS/N比である。その他のノイズは努力しだいで除けるものとする。ひとたびピックアップ電極の内径(チェンバー中心から電極面までの半径)Rがビームステイクリアランスにより決定したとすると要求分解能を満たすためのS/N比( $A_p/e_N$ )が下記の式で求まる。

$$S/N = A_p/e_N = \frac{R}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sigma_x}$$

ここで $\sigma_x$ は要求分解能である。例えばATFリニアック

クの場合 $R=15\text{mm}$ 、 $\sigma_x=1\mu\text{m}$ なら $S/N$ は5303以上が必要である。この式は位置感度係数を $R/2$ で近似して得られたものである。

#### パルスストレッチャー部の設計

サンプルホールド回路がそれほど速いパルスをサンプルできないのでピックアップからの入力信号を時間的に延ばす必要がある。これにはローパスフィルターを使用するがそのままだと信号振幅が非常に小さくなってしまいうので低雑音アンプとの組み合わせで構成する。これらのアンプのゲインおよび $NF$ （ノイズフィギュア）は、出力につながるサンプルホールド回路の信号損失と熱雑音とを考慮に入れて必要な $S/N$ から算出する。具体的設計は回路シミュレーターにより行なわれた。さて、メインのローパスフィルターは波形歪をさげ後ろにリングを生じないベッセル特性（遅延平坦特性）をもつものが有利である。このタイプのフィルターとして伝達関数がガウシアンに近くなるような多項式（6ポール程度）で近似実現されるガウシアンフィルターを使用した。パルスストレッチャー部の回路は参考文献[1]を参照されたい。入力にあるキャリブレーションポートは各チャンネル間のゲインの違いを校正するために使用するもので後述する。

#### サンプルホールド部およびトリガー発生部の設計

サンプルホールドはその量子化ビットがノイズ振幅より小さくなければならず、高分解能の処理回路の場合16ビットのA/D変換器が必要となる。このようなA/D変換器は当然の事ながら数十 $\mu\text{s}$ の変換時間を必要とし、そのためにはその時間内だけ信号を一時的にホールドする回路が必要となる。ホールドのためにはセルフトリガー機構があると交換などの保守も簡単となるのでセルフトリガー機構を採用した。回路はパルスストレッチ後の信号からトリガー生成を行い自分自身をトラックホールドするものであり、参考文献[1]を参照されたい。ビーム位置をワンショットで測定するためには対向する電極の信号を同時にホールドする必要があるがモジュールを2chで作り同時サンプルホールドを行うのはそのためである。これによってショット毎に異なる電荷数のビームの位置測定や、信号と同時に乗ってくる同じ振幅のノイズの除去が可能となる。

ノイズの乗った信号ラインのサンプルホールドでは、ビーム信号の期待される区間のみでゲートを設けそこに入ってきたパルスのみをサンプルホールドするという方式をとらないとノイズで誤動作してしまうのでビーム信号位置と同期したゲート信号を使用する。それは全モジュール同士の測定の同期をとるためにも必要である。すなわち、外部から供給するこのゲート信号を1回だけ発行すると、各モジュールではゲート内のビームパルス信号でセルフトリガーされそれをサンプルホールドするので、特定のバンチのワンショット位置測定を全位置モニターで同時に行うことができビーム軌道をフリーズできる。

#### 4. ATFリニアックのBPMシステム

このように開発してきたBPM、およびエレクトロニクスをATFリニアックヘシステムとして組み込む場合、ビーム診断上の必要性と予算との兼ね合いからマルチプレクシングを採用しなければならなかった。マルチプレクシングでビーム位置を測定することは、パルス毎にビーム位置ジッターあるいはビーム位置振動があった場合それらを込で測定してしまうので、得られた軌道内の変動成分をそのままでは信用できないので注意が必要である。

さてマルチプレクシングを行う位置であるが、マルチプレクシングのリレー部分をチャンネル間のゲイン差補正に含める必要があるので、校正用信号合成部の下流部分でマルチプレクシングをするのが適当であり、パルスストレッチャー部とサンプルホールド部の間に挿入するのがよいと考えられる。これにより費用のかかるサンプルホールド部の数を減らすことができる。この時パルスストレッチャー部はピックアップ電極に対応する数だけ必要になるが、それに加える校正用信号もまたマルチプレクサーで切り替えて使用する。同一のゲートを供給するためゲートタイミングをそろえる必要から、ひとつのサンプルホールド部に入るビーム信号はどのピックアップからも同じタイミングである必要があり、ビーム通過時間遅れも考慮した電気長をすべてそろえる必要がある。そのため使用したケーブルRG-223/uは4本組でひとつのBPMからパルスストレッチャー部までその電気長が50ps以内でそろえられ、さらにそれらの組どうしでも電気長が調整されており、観測されたビーム信号が5ns以下で一致しており同一ゲートで測定可能である。ビーム位置測定のタイミングはゲート発生器に入力するトリガーのオンオフでのみ行い、ビームに同期した測定を行う事ができる。一度ゲートが配られるとその時のビーム信号がホールドされその後のビーム信号では何も働かない。読みだしはゲート発生後任意の時間に行なえば良く、読みだした後さらにマルチプレクサーを切り替えまたゲート発生用のトリガーを1発出す。これを繰り返すすべてのピックアップを読みだすことになる。これで得られるのは何個かの異なったバンチの、異なった時間のビーム位置である。

BPMシステムは、ATFリニアックとBTラインを全部で5ブロックに区切り、リニアック入射部は組み込みスペースがないためボタン型BPM6台を使用し、BTラインはアライメント方式がリニアックとは異なり直接Qマグネットをアラインする方式のため、ストリップラインBPM6台をQマグネットに組み込んだ。リニアック内にはストリップラインBPMが18台ある。エレクトロニクスは各ブロック毎に1セットあり、ブロック内でBPM信号がマルチプレックスされる。各ブロック6chマルチプレックスであるので、ビーム軌道測定は、全ブロック同時切り替えを行なった時が一番高速であり、ビーム6パルスで全軌道が測定できる。実際にはリレーの切り替えを確実にするため1ないし2秒切り替え時間の余裕をみるので、全軌道測定に10秒程度かかる。

#### 5. BPMの校正[2]

ATFリニアックではビーム進行横方向の加速器構成要素の設置は、架台上面のエッジ端面への押しつけによって行っている。この場合、架台上面とエッジ端面から高さ400mm、水平方向250mmの位置に基準位置（機械的中心）が定義される。Qマグネットの中心は平面架台を介して、このBPMの機械的中心と関係づけられる。また、BPMの信号から直接得られる情報は、4つの電極の信号が等しくなる位置（電気的中心）である。そこで、BPMからの正確なビーム位置情報を得るためには、この機械的中心と電気的中心の関係、つまり機械中心オフセットを求めておく（BPMの校正）必要がある。校正作業は精度よく計測され校正された架台およびワイヤーを用い、それにBPMをセットし、ワイヤーにパルス信号を与え、そのときBPMからピックアップされる信号を測定することにより電気的中心と機械的中心の関係を計測する。このような校正で得られた10台のBPMについてのオフセット分布からx、y方向に対する

オフセットの平均値および標準偏差は  $X_{offset} = -4.1 \mu\text{m}$ 、 $Y_{offset} = -5.8 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{x,y} = 4.3 \mu\text{m}$ であった。測定したBPMの中には、平均値より著しくはずれたものはなかった。また、これらのオフセットの値は測定の誤差と製作精度から期待されるものと一致している。

### 6. BPMエレクトロニクスの校正[3]

エレクトロニクスを校正するために信号ペダスタルの除去と2チャンネル間のゲイン差の補正を行なう必要がある。まず信号ペダスタルの除去についてであるが、信号にのってくるDCオフセット成分や遅い変化のノイズ成分まで含めて信号ピーク値をサンプルホールドしてしまうので、このペダスタル成分の除去をビーム信号直前の部分をサンプルホールドしそれを記録しておきその後の測定時に生の信号から差し引く事で行なう。もう一つは2チャンネル間のゲイン差の補正であるが、ピックアップ電極からサンプルホールド後までのゲイン差を測定できれば理想的であるが、簡単のためエレクトロニクスのみでのゲイン差を測定、補正する。この測定のためにエレクトロニクス入力部に校正用信号入力端子を設け、内部でこの信号を完全に2等分してそれぞれのチャンネルに合成してやらなければならない。2等分に誤差があればそれが校正の誤差となり、測定したビーム絶対位置の誤差(オフセット)のひとつとなる。校正用信号にはビーム信号にできるだけ近い形のものを使用する。

### 7. 軌道測定ソフトウェアと軌道補正

軌道測定はワークステーション上のVシステムウィンドーから行なっている。このウィンドーからは軌道測定を行なうボタンの他、ペダスタル測定を行なうボタン、機械中心オフセットを設定するウィンドー、軌道補正計算をするボタン、軌道補正のステアリングマグネットの設定値をマグネットにセットするボタン等がある。現状ではエレクトロニクスの校正を行なうためのパルス発生回路が未開発なので、ゲイン比較はまだ行なわれていない。軌道測定ボタンによりBPMを読める他、任意のBPMを任意の回数だけ読みだし、そのBPMからの位置情報のみを引き出す事ができるようになっている。この機能によりビーム位置ジッターを計測できるようになっている。ビーム軌道のディスプレイにはX軌道、Y軌道その他、4つの電極信号の和をビーム強度としてプロットしてあり、どこでビームロスしているかがわかるように

なっている。図1に軌道測定例を示す。ビーム軌道が $\pm 2\text{mm}$ 程度の場合の例であり、通常の運転はこのような軌道で行なっている。Z方向で一の部分は入射部のボタン信号の部分であり、他のストリップラインとはその特性が異なるので注意が必要である。とくに4つの電極信号の和は、まだ全減衰量の校正を行なっていないので、そのまま強度比較ができない事に注意してほしい。

軌道補正は、測定されたビーム位置情報をプログラム'SAD'に引き渡し、現在のステアリングマグネットの値とQマグネットの値、および加速管によるエネルギーゲインとから、その軌道をX、Yとも0にするためのステアリングマグネットの値を計算し、それを'SAD'からもらい、各マグネットに設定することで行なう。いろいろな誤差がはいってくるので補正は一回ではうまくいかず、4回程度の繰り返し測定補正および設定が必要であった。

### 8. 問題点と今後の課題

このBPMシステムは稼働したばかりであり、いろいろなバグや測定値自身の信頼度に問題がある。繰り返し測定の再現性は比較的良好で $100 \mu\text{m}$ 程度であり、ビーム自身のジッターで説明可能である。しかしながら、ある部分のビームの絶対位置がスクリーンモニターと食い違う、比較的近傍のBPMで $1\sim 2\text{mm}$ の段差がついてどう補正しても残るなどの問題点を解決しなければならない。またエレクトロニクス校正用のパルサーを開発して各チャンネルのゲイン差を補正する事、ピックアップからケーブルおよびエレクトロニクスまで含めた減衰を測定しビーム強度を正確に表示する事などを行なわなければならない。また、予算がつき次第エレクトロニクスを増強してマルチプレクサーを取り除き、シングルショット測定ができる様にして行きたいと考えている。

最後にこのようなBPMシステムを開発していくにあたりいろいろ協力してくださった竹田、浦川両氏をはじめとするATFのスタッフ、学生諸氏、建設協力の方々に感謝いたします。

### 参考文献

- [1]H.Hayano,T.Shintake;Submicron Beam Position Monitors for Japan Linear Collider;Proc. of 16th Inte. Linac Conference(1992)
- [2]S.Kashiwagi, H.Hayano;ATFリニアック用ストリップライン型ビーム位置モニターの校正;Proc. of 20th Lenea Accelerator Meeting in Japan(1995)
- [3]H.Hayano et.al.;High resolution BPM for FFTB;NIM A320(1992)47

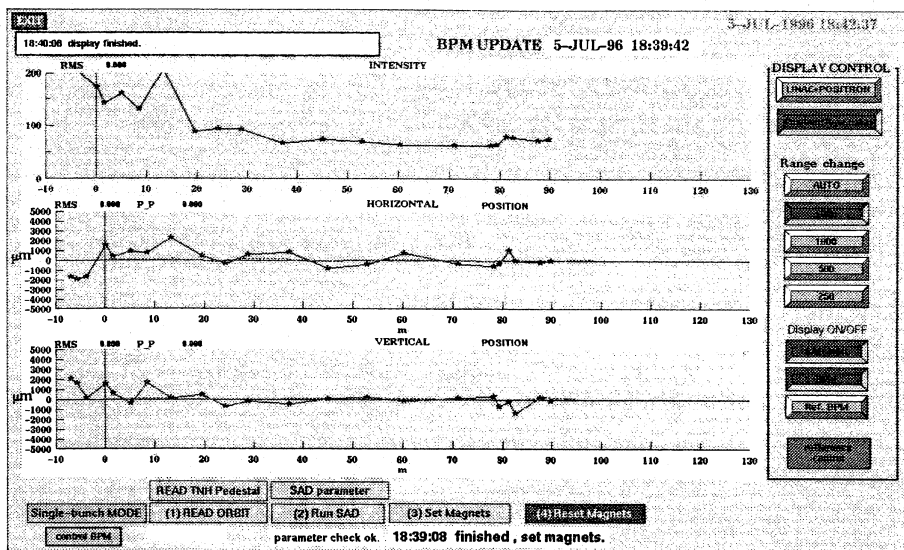


図1 軌道測定例